مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۵، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱
ص ۲۲۶-۲۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۳۰
تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳

تعریف واحدهای واکنش هیدرولوژیک پیوسته مکانی برای مدل‌سازی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز کوهستانی با SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان)

❖ **مرضیه حاجی‌محمدی؛** دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
❖ **علی‌اکبر نظری‌سامانی*؛** دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
❖ **آرش زارع گاریزی؛** استادیار دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
❖ **حمیدرضا کشتکار؛** استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
❖ **محمود عرب‌خدری؛** استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
❖ **امیر سعدالدین؛** دانشیار دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

چکیده

مدل SWAT از پر کاربردترین مدل‌های شبیه‌سازی حوزۀ آبخیز و پیش‌بینی تأثیر اقدامات حفاظتی آبخیزداری می‌باشد. در این مدل، شبیه‌سازی فرآیندهای آبخیز بر پایه واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRUs) صورت می‌گیرد که از روی‌هم‌گذاری نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی، خاک و شیب ایجاد می‌شوند. در حالی‌که در فرآیند ایجاد HRUs، این واحدها ماهیت مفهومی پیدا کرده و موقعیت مکانی خود را از دست می‌دهند. این رویکرد برای شبیه‌سازی حوزه‌های آبخیز بزرگ و ناهمگن، از نظر کارایی محاسباتی مفید و اغلب اجتناب ناپذیر است. اما چنانچه هدف، مکان‌یابی و ارزیابی اثربخشی روش‌های مدیریتی بر رواناب، رسوب و آلاینده‌ها در یک حوضه متوسط تا کوچک باشد، مشخص بودن مکان دقیق HRUs ضرورت دارد. هدف از این مطالعه، ارائه روشی برای مستقل/مکانی نمودن HRUs و مقایسه نتایج شبیه‌سازی بر پایه آن با حالت استاندارد مدل بود. در این روش، با انجام پیش‌پردازش‌های اولیه در GIS و تخصیص اسامی منحصر به فرد به واحدهای خاک، HRUs مستقل و مشخص مکانی تعریف می‌شود. مقایسه خروجی‌های مدل در حالت HRUs مکانی با حالت HRUs مفهومی (استاندارد مدل) برای حوزه آبخیز طالقان نشان داد که، نتایج بسیار مشابه می‌باشد و تفاوت معنی‌داری در خروجی‌های مدل مشاهده نمی‌شود. در اجرای مدل براساس حالت استاندارد، ضریب نش-ساتکلیف رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده در خروجی حوضه به‌ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۶۴ و در اجرای مدل براساس HRUs مکانی به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۶۱ به‌دست آمد. تعریف HRUs مکانی با روش پیشنهادی، خروجی‌های ملموس‌تر و کاربردی‌تری ارائه می‌نماید که برای شناسایی مناطق بحرانی حوضه و مکان‌یابی اقدامات حفاظتی نسبت به رویکرد HRUs مفهومی، مطلوب‌تر خواهد بود.

واژگان کلیدی: حوزه آبخیز طالقان، مدل هیدرولوژیکی SWAT، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، اقدامات مدیریتی، HRUs مستقل.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۱۲۲۶۴۳۶۰۱
Email: aknazari@ut.ac.ir

۱. مقدمه

مدل‌های هیدرولوژی یکی از اجزای ضروری تحقیق و مدیریت منابع آب می‌باشند. این مدل‌ها به درک وضعیت گذشته و حاضر منابع آب در حوضه کمک می‌کنند و امکان ارزیابی پیامدهای اقدامات مدیریتی و تغییرات تحمیلی (مانند تغییر اقلیم) را فراهم می‌سازند [۱۴].

ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT[1]) یکی از پرکاربردترین مدل‌های اکوهیدرولوژی است که به منظور برآورد اثر کاربری و اقدامات مدیریتی بر کمیت و کیفیت آب در دوره پیوسته طولانی مدت توسعه یافته است [۱۱] و تاکنون برای طیف متنوعی از مقیاس‌ها و شرایط محیطی حوزه آبخیز آزموده شده است [۱۱، ۲۷، ۱۶، ۶]. این مدل، مدلی فیزیکی است که به جای استفاده از روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه اخذ نموده و فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و ... در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل از نظر محاسباتی بسیار کارآمد بوده و شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده با استراتژی‌های مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل اجرا است و کاربر را قادر به مطالعه اثر بلند مدت برخی از عوامل مانند تغییرات آب و هوا، آلودگی، فرسایش و... می‌کند. در این مدل نیمه توزیعی اولین مرحله از مدل‌سازی تقسیم حوضه به تعدادی زیرحوضه می‌باشد که براساس توپوگرافی و شبکه جریان صورت می‌پذیرد و جریان و آلاینده‌های مرتبط با آن از یک زیرحوضه به زیرحوضه دیگر هدایت می‌شوند. کوچکترین واحدهای مکانی در این مدل، واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRUs) هستند. در حالت استاندارد HRUs براساس پوشش گیاهی، خاک و شیب و آستانه‌ای که توسط کاربر تعیین می‌گردد، در هر زیرحوضه تعریف می‌شوند. در این روش کاربر با تغییر سطح آستانه می‌تواند تعداد HRUs را کنترل کند. اگرچه این واحدها به ساده‌سازی فرایند مدل‌سازی و بهبود کارایی محاسباتی کمک می‌کنند اما از نظر مکانی با هم در ارتباط نیستند؛ به بیان دیگر چندین واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) با کاربری اراضی، خاک و شیب یکسان در بخش‌های مختلف یک زیرحوضه به عنوان یک HRU در نظر گرفته می‌شوند. به علاوه با تعیین سطح آستانه در ایجاد HRUs شناسایی موقعیت مکانی HRUهای مجزا اغلب غیرعملی خواهد بود [۲۵]. این ویژگی منحصر به فرد نبودن HRUs در برخی مطالعات به عنوان ضعف کلیدی این مدل شناخته شده است [۱۱، ۹]. زیرا در برخی موارد بنا به هدف تحقیق ممکن است اعمال اقدامات مدیریتی برای واحدهای مجزا و به دنبال آن تعیین ورودی و خروجی برای واحدهای مستقل مکانی حائز اهمیت باشد. بطور مثال چنانچه هدف بررسی تاثیر اعمال یک اقدام حفاظتی در بخش مشخصی از زیرحوضه به منظور کاهش کل رسوب خروجی از حوضه باشد، لازم است پارامترهای ورودی مربوط به واحد مکانی موردنظر متناسب با اقدام حفاظتی تنظیم شوند و در نهایت تاثیر آن بر خروجی واحد موردنظر و رسوب کل بررسی شود. در این حالت امکان پیش‌بینی تاثیر اقدامات و یا بهینه‌سازی آن‌ها برپایه حالت استاندارد مدل امکان‌پذیر نمی‌باشد. برخی محققین لزوم مکانی بودن خروجی مدل (ویا واحدهای واکنش هیدرولوژیک) را با پس‌پردازش برطرف کرده‌اند. بطور مثال Gitau و همکاران [۱۳] توسط ابزار Field-SWAT و تابعی در MATLAB خروجی مدل را که براساس HRU بود به نقشه پلیگونی مرزهای زمینی مورد نظر تعمیم دادند. اما در برخی موارد لازم است از ابتدا مدل، HRUs را مجزا در نظر بگیرد به عنوان مثال اغلب اقدامات

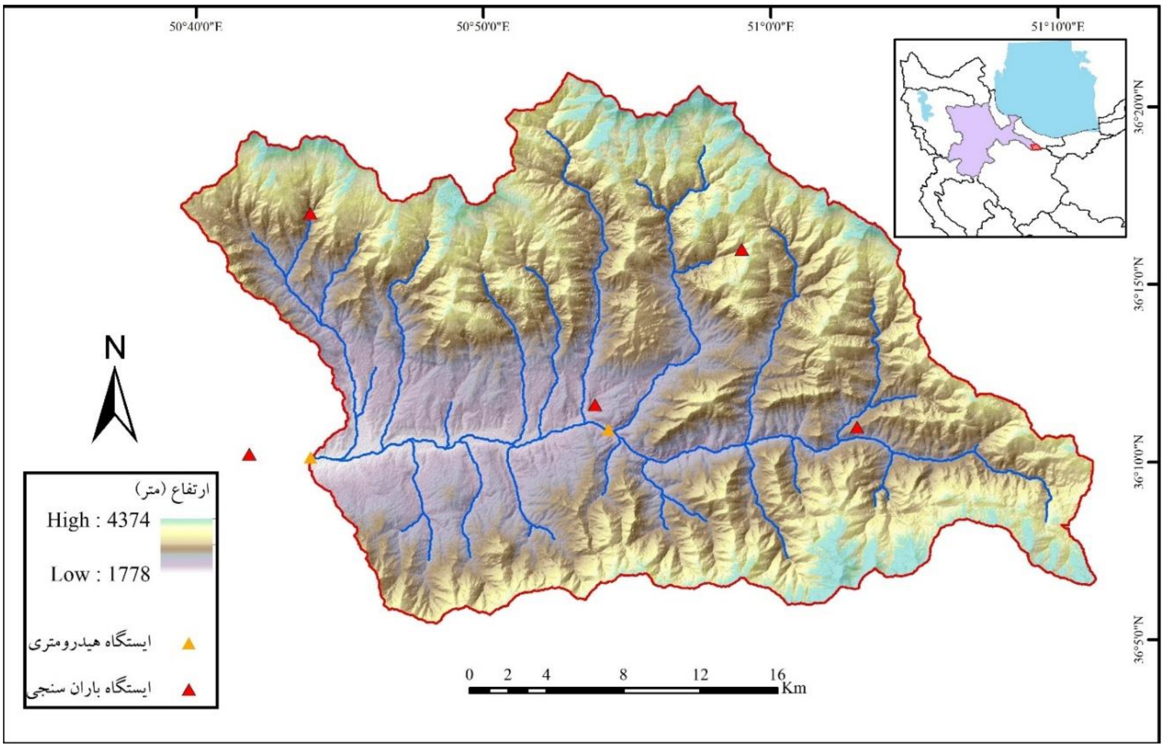
[1] Soil and Water Assessment tool

حفاظتی در مقیاس HRU شبیه‌سازی می‌شوند که در صورت پیوسته نبودن HRUs این مسئله غیرممکن است. Veith و همکاران [۲۸]، Ghebremichael و همکاران [۱۲]، Kalcic و همکاران [۱۵] و Teshager و همکاران [۲۵]، Merriman و همکاران [۱۸]، از طریق پیش پردازش اطلاعات ورودی، نقشه HRUs پیوسته، مکانی و مستقل تهیه کردند. تاکنون تحقیقات صورت گرفته در این زمینه در حوضه‌های کشاورزی ودر مناطق نسبتا مسطح بوده و در داخل کشور و مناطق کوهستانی با شیب متنوع مطالعه‌ای انجام نشده است. هدف از مطالعه حاضر ۱) پیش پردازش اطلاعات ورودی مدل SWAT به منظور ایجاد HRUs مکانی، پیوسته و مجزا، ۲) اجرای مدل SWAT براساس نقشه HRUs مکانی مستقل و از پیش تهیه شده ۳) مقایسه نتایج خروجی مدل براساس حالت استاندارد مدل با رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده براساس HRUs مستقل در منطقه کوهستانی، می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه قسمتی از حوزه آبخیز طالقان است که بین عرض‌های شمالی ″۲۳ ′۵ °۳۶ و ″۴۸ ′۲۰ °۳۶ و طول‌های شرقی ″۳۵ ′۳۹ °۵۰ و ″۷ ′۱۱ °۵۱ واقع شده است. این زیرحوضه به دلیل تجهیز به چند ایستگاه هیدرومتری و باران‌سنجی، وجود اطلاعات و نقشه‌های پایه مناسب، به منظور اجرای مدل SWAT براساس HRUs تعریف شده انتخاب شد (شکل ۱). مساحت تقریبی این حوضه حدود ۸۰۰ کیلومترمربع است و یکی از زیرحوضه‌های سفیدرود محسوب می‌شود. این حوضه کوهستانی بوده و متوسط ارتفاع و شیب به‌ترتیب ۲۷۳۰ متر از سطح دریا و ۴۸ درصد می‌باشد. سطح غالب منطقه دارای پوشش مرتعی (۸۴ درصد) است و اراضی بدون پوشش، باغات، اراضی کشاورزی و منطقه مسکونی بخش کوچکی از سطح حوزه آبخیز طالقان را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

۲.۲. اطلاعات ورودی مدل

داده‌های مکانی مورد نیاز جهت اجرای مدل شامل مدل رقومی ارتفاع، نقشه کاربری/پوشش اراضی و نقشه خاک در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ بود. مدل رقومی ارتفاع با دقت ۱۲/۵ × ۱۲/۵ متر از AFS[1] تهیه شد. به منظور تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی نقاط تعلیمی براساس نظر کارشناس آبخیزداری منطقه و تصاویر Google Earth ایجاد شد و نقشه کاربری/پوشش اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره ای TM مربوط به سال ۲۰۰۲ تهیه شد. اطلاعات مکانی خاک از گزارش خاک‌شناسی تهیه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای تهران استخراج شد [۲۴]. همچنین داده‌های روزانه هواشناسی، باران سنجی و هیدرومتری ایستگاه‌های مربوط به منطقه مطالعاتی برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ از سازمان هواشناسی کشور و دفتر مطالعات پایه منابع آب (تماب) تهیه شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل یک نشان داده شده است. ایستگاه‌های هیدرومتری جوستان و گلینک به‌ترتیب در مرکز و خروجی حوضه به منظور برآورد دقت مدل در شبیه‌سازی متغیرهای رواناب و رسوب انتخاب شدند.

۲.۳. پیش‌پردازش نقشه خاک و کاربری/پوشش اراضی

همانطور که گفته شد، در اجرای استاندارد مدل SWAT، HRUs از نظر مکانی مجزا نیستند؛ از این‌رو یک روش پردازش اطلاعات بر پایه ArcGIS و تهیه نقشه پیش فرض HRUs به منظور حل این مشکل است. در این پژوهش نیز اجرای فرایند پیش پردازش نقشه‌های خاک و کاربری/پوشش اراضی جهت تعریف HRUs مستقل مکانی در هر زیرحوضه توسط ابزار ArcGIS انجام شد. در این روش تغییری در ساختار مدل در زمینه ایجاد نقشه HRU ایجاد نشد اما اطلاعات ورودی شامل کاربری/پوشش اراضی و خاک به گونه‌ای تنظیم شد که HRUs مستقل و پیوسته ایجاد شود و در نتیجه داده‌های ورودی و خروجی مدل از نظر مکانی قابل شناسایی باشند [۲۵].

مراحل اجرای این روش به شرح زیر است:

۱. اجرای مرحله اول مدل SWAT و تهیه نقشه زیرحوضه‌ها براساس مدل رقومی

۲. روی‌هم‌گذاری پلیگون‌های خاک، کاربری/پوشش اراضی و زیرحوضه‌ها

۳. ادغام پلی‌گون‌های کوچک (در این مطالعه، کمتر از ۶ هکتار) در هر زیرحوضه

۴. نام‌گذاری مستقل پلیگون‌های خاک در هر زیرحوضه

۵. تبدیل نقشه نهایی (HRU) به فرمت رستری

در ادامه، مراحل بعدی مدل‌سازی SWAT توسط نقشه HRUs تهیه شده اجرا می‌شود. به‌طوری‌که، نقشه مذکور یکبار به عنوان نقشه کاربری اراضی و در مرحله بعد به عنوان نقشه خاک به مدل وارد می‌شود. ضمناً لازم است در مدل برای نقشه طبقات شیب، فقط یک طبقه شیب تعریف شود. سپس در مرحله تعریف HRUs، حد آستانه برای هر سه پارامتر (کاربری/پوشش اراضی، خاک و شیب)، صفر در نظر گرفته می‌شود. در این صورت نقشه HRU ایجاد شده توسط مدل با نقشه HRU حاصل از اجرای پنج مرحله ذکر شده در بالا یکسان خواهد بود.

هدف اصلی از اجرای مراحل فوق تعریف HRUs مکانی و منحصر به فرد در هر زیرحوضه با ابزار ArcGIS پیش از اجرای مدل است. این روش به تخصیص داده‌های مدیریتی ورودی به HRUs مربوط به مکان مشخصی از حوضه مورد مطالعه، ارائه نتایج خروجی در سطح HRU، و تحلیل تغییرات کاربری/پوشش اراضی در سطح HRU کمک می‌کند [۲۵].

۲.۴. تنظیم اولیه مدل

پس از وارد کردن داده‌های ورودی، نرم‌افزار مدلِ SWAT مقادیری پیش‌فرض برای پارامترهای مدل لحاظ

---

[1] Alaska Satellite Facility

می‌کند و مدل با همان مقادیر پیش‌فرض قابل اجرا است. امّا بهتر است برای کسب نتایج منطقی‌تر، از ابتدا برخی پارامترهای اصلی را تغییر داد. در این راستا، به منظور برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، شماره منحنی و روندیابی به‌ترتیب روش‌های Hargreaves، رطوبت خاک و Muskingum انتخاب شد. اطلاعات مربوط به آب پایه براساس داده‌های دبی روزانه و با بکارگیری برنامه خودکار ارائه شده توسط Arnold و Allen [۳] محاسبه شد. براین اساس ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی (alpha_bf) ۰/۰۱۳ روز بدست آمد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و سهم ذوب برف در رواناب حوضه تعریف باندهای ارتفاعی ضروری بود، درنتیجه ۵ باند ارتفاعی تعریف و گرادیان دما و بارش به‌ترتیب ۶/۴- درجه سانتی گراد و ۲۳۵ میلی‌متر به ازای یک کیلومتر افزایش ارتفاع در نظر گرفته شد [۱]. لازم به ذکر است که موارد فوق مستقل از HRU بوده و به شرایط کلی منطقه بستگی دارد، بنابراین برای هر دو حلت اجرای مدل یکسان در نظر گرفته شد. به علاوه از آنجایی‌که هدف این تحقیق ارزیابی دقت مدل براساس رویکرد HRUs مکانی بود، اجرای مدل به دو صورت استاندارد و براساس HRUs مکانی در شرایط مساوی ضرورت داشت. از این‌رو واسنجی مدل برای هر دو رویکرد انجام شد.

۲.۵. مقایسه نتایج مدل

مدل یکبار بصورت استاندارد و بار دیگر براساس HRUs تعریف شده برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۸ بصورت ماهانه اجرا شد. رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده براساس ضرایب تعیین (R^2)، نش ساتکلیف (NS) و درصد خطا (PBIAS) با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. همچنین این ضرایب به منظور مقایسه نتایج مدل‌سازی براساس دو رویکرد (HRUs مفهومی و HRUs مکانی) استفاده شد.

ضرایب آماری مذکور دقت مدل را به‌ترتیب براساس روابط ۱ تا ۳ ارزیابی می‌کند.

رابطه (۱)
$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})-(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2}}\right]^2$$

رابطه (۲)
$$NSE = 1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\right]$$

رابطه (۳)
$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)*100}{\sum_{i=1}^{n}(O_i)}\right]$$

در روابط فوق، n: تعداد داده، O_i: مقدار مشاهداتی، P_i: مقدار شبیه سازی شده توسط مدل، $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد.

۳. نتایج

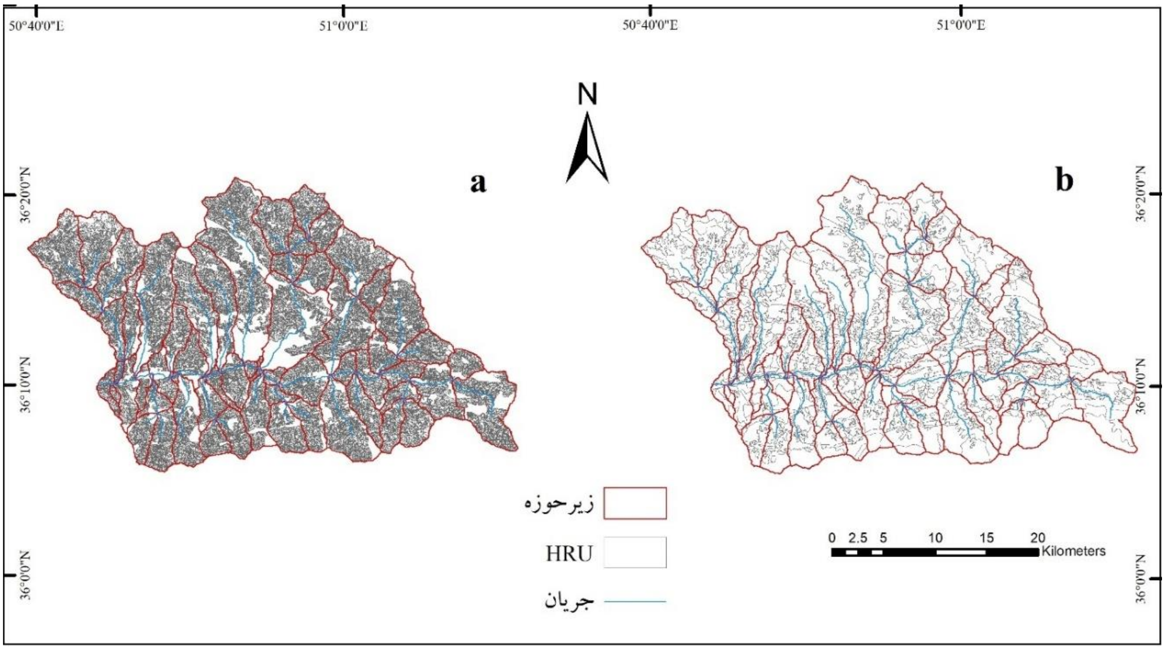
۳.۱. اجرای مدل بر پایه دو رویکرد

در هر دو رویکرد HRUs استاندارد (مفهومی) و HRUs مکانی، ابتدا حوضه به ۶۳ زیرحوضه تقسیم شد. در مرحله تعریف HRUs، در روش استاندارد با در نظر گرفتن ۵ طبقه شیب و حد آستانه ۱۰ درصد برای خاک، کاربری/پوشش اراضی و شیب، ۹۲۷ HRU و در روش HRUs مکانی به دنبال پیش پردازش نقشه خاک و کاربری/پوشش اراضی و با در نظر گرفتن یک طبقه شیب و حد آستانه صفر درصد برای هر سه نقشه، ۱۴۶۱ HRU ایجاد شد. شکل ۲ نقشه HRU را براساس هر دو روش نشان می‌دهد.

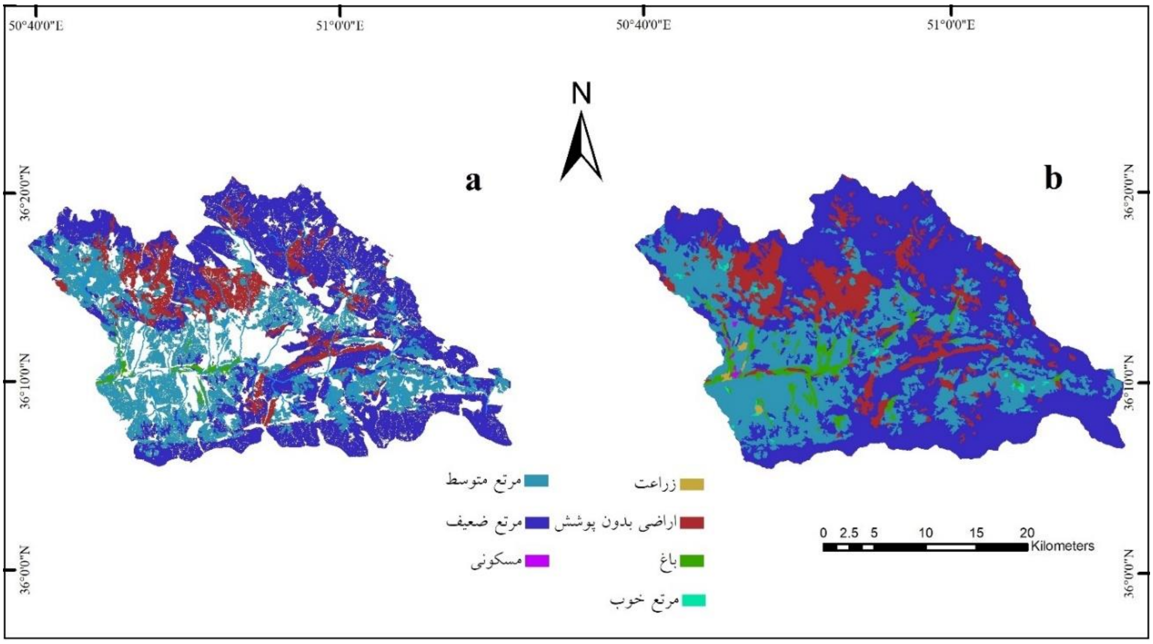
۳.۲. تغییرات ایجاد شده در اطلاعات ورودی

تهیه نقشه HRU با روش پیشنهادی، کوچکترین تغییری در اطلاعات کاربری/پوشش اراضی و خاک منطقه ایجاد نکرد. اما در روش استاندارد مدل همانطور که قبلا نیز گفته شد، با در نظر گرفتن یک حد آستانه، که این حد توسط Winchell و همکاران [۲۹]، ۱۰ درصد پیشنهاد شده است، برخی واحدها که درصد کمی از سطح حوضه را به خود اختصاص داده بودند، ادغام شدند. برای مثال در

شکل ۳ نقشه کاربری/پوشش اراضی برای هر دو حالت آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در اجرای استاندارد مدل، طبقات مراتع خوب و کاربری مسکونی در شبیه‌سازی مدل در نظر گرفته نشده است. در مورد خاک نیز به همین ترتیب برخی واحدهای کوچک در شبیه‌سازی مدل نقشی نداشته‌اند.



شکل ۲. نقشه HRU ایجاد شده براساس روش استاندارد مدل (a) و رویکرد HRU مکانی (b)
(در قسمت‌های خالی نقشه b، HRU تعریف نشده است)

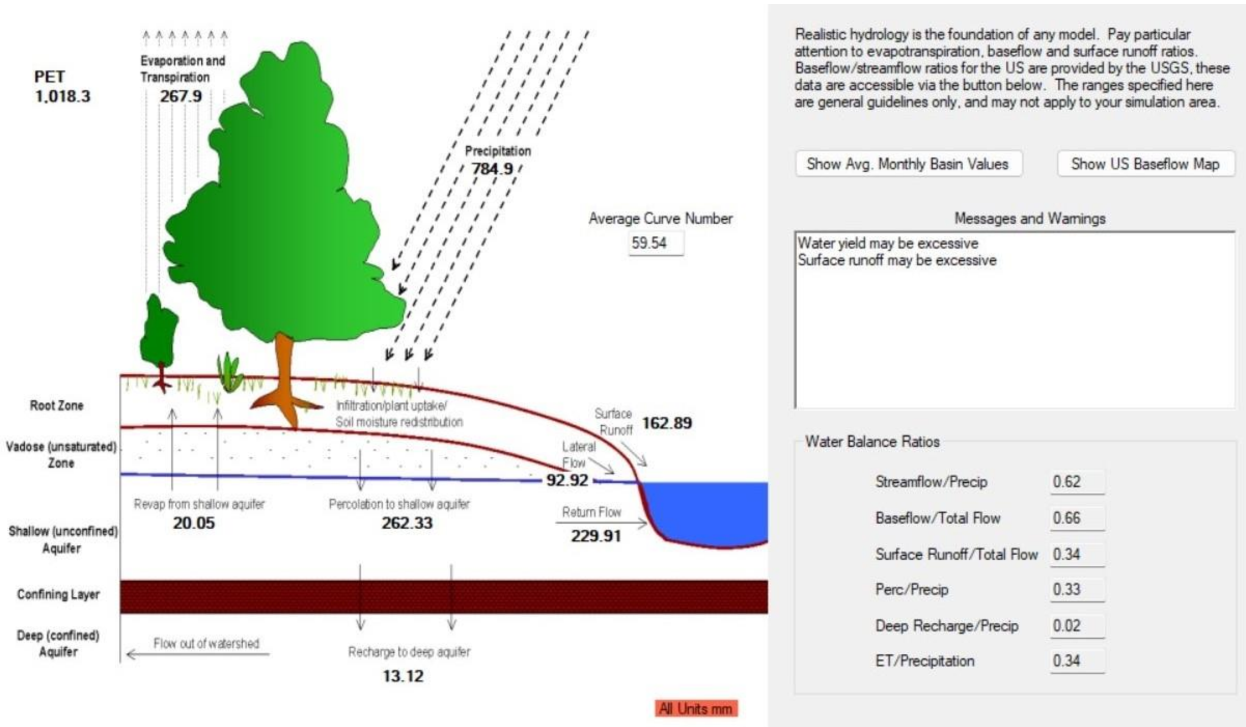


شکل ۳. کاربری/پوشش اراضی در نظر گرفته شده توسط مدل براساس روش استاندارد مدل (a) و رویکرد HRU مکانی (b)
(قسمت‌های خالی نقشه b کاربری‌های ادغام شده در حالت استاندارد را نشان می‌دهد)

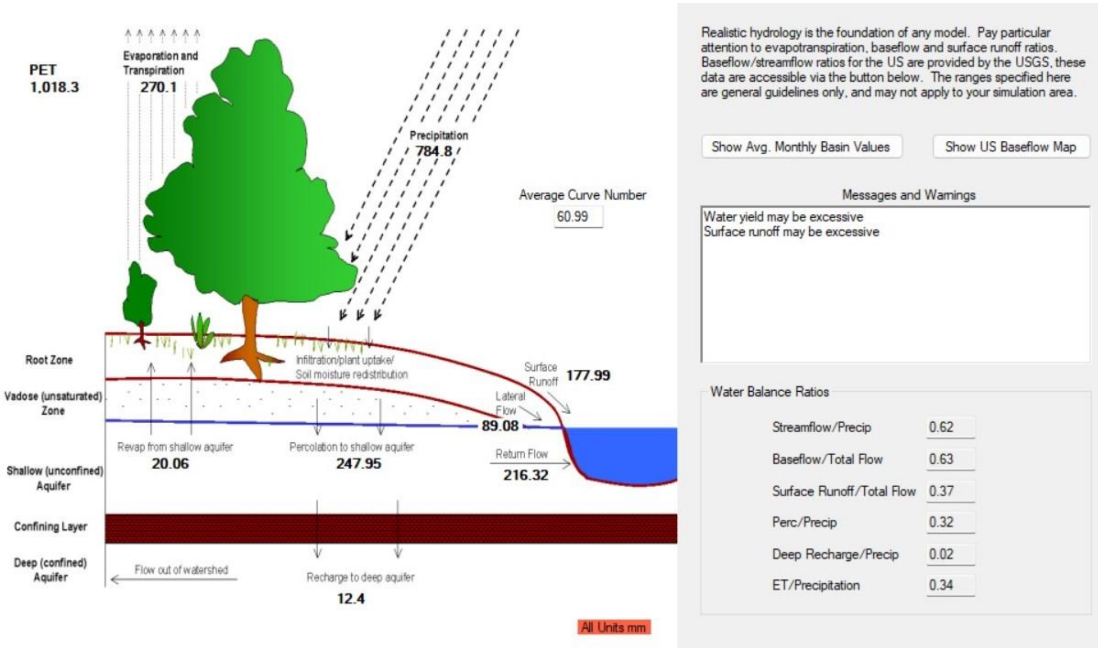
۳.۳. دقت شبیه‌سازی مدل

مدل برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۸ با در نظر گرفتن سه سال WARM UP به‌صورت ماهانه اجرا شد. با وجود کالیبره نبودن مدل و تنها با اعمال تنظیماتی که در قسمت قبل ذکر شد مقادیر بیلان آب منطقی بدست آمد (شکل‌های ۴ و ۵). بطوریکه نسبت رواناب به بارش برای دو حالت استاندارد و مبتنی بر HRU تعریف شده ۰/۶۲ و نسبت آب پایه به کل جریان براساس دو روش به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۳ بدست آمد. مرادی‌پور [۱۹] توسط مدل wetspa ضریب رواناب را برای زیرحوضه‌های مختلف طالقان ۰/۶۳ تا ۰/۷۴ بدست آورد [۱۰]. درصد آب پایه توسط پکیج EcoHydRology در R با در نظر گرفتن ضریب آلفا برابر ۰/۹۰، ۰/۹۲۵ و ۰/۹۵ به‌ترتیب ۰/۷۰، ۰/۶۴ و ۰/۵۶ محاسبه شد. با انتخاب روش Hargreaves مقادیر تبخیر تعرق واقعی در حلت استلندارد و مبتنی بر HRU تعریف شده به‌ترتیب ۲۶۸ و ۲۷۰ میلی متر در سال و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس هر دو روش ۱۰۱۸ میلی‌متر در سال برآورد شد. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی براساس گزارش بیلان آب تهیه شده توسط وزارت نیرو تا سال ۱۳۹۰ برابر ۲۳۹/۲۶ میلی‌متر بود. میانگین شماره منحنی برای کل حوضه در روش استاندارد ۵۹/۵۴ و در روش دوم ۶۱/۰ بدست آمد. احتمالأ ادغام کاربری مسکونی با دیگر واحدهای کاربری/پوشش در روش استاندارد، دلیل کمتر شدن میانگین شماره منحنی در این روش است.

بطور کلی خطای مدل را می‌توان به عدم قطعیت در پارامترها، عدم قطعیت در اندازه‌گیری متغیرها و خطای ناشی از ساده‌سازی بیش از حد ساختار مدل نسبت داد [۷]. در مورد شبیه‌سازی مقادیر رسوب تأیید بیش برآورد یا کم برآورد مدل میسر نیست زیرا نمونه‌های اندازه گیری شده ممکن است به دلیل ثبت نشدن یک رویداد کوتاه مدت یا ثبت یک رویداد کوتاه مدت و تعمیم آن به کل روز به‌ترتیب دارای کم برآورد و بیش برآورد باشند. به علاوه خطاهای اندازه‌گیری می‌تواند به دلیل انتخاب مکان نمونه‌برداری نامناسب یا در طول تحلیل‌های آزمایشگاهی رخ دهد [۵]. مشکل دیگر در واسنجی بار رسوبی به ساختار مدل SWAT برمی‌گردد.



شکل ۴. بیلان آب شبیه‌سازی شده براساس روش استاندارد مدل



شکل ۵. بیلان آب شبیه‌سازی شده بر اساس رویکرد HRU مکانی

SWAT از روش MUSLE برای برآورد تلفات خاک از هر HRU در یک زیرحوضه استفاده می‌کند؛ سپس مجموع آن را به عنوان رسوب کل زیرحوضه در نظر می‌گیرد. مدل MUSLE با استفاده از داده‌های ۱۸ حوزه آبخیز در جنوب ایالت متحده آمریکا توسعه یافت و به خوبی تغییرات مشاهده شده در بارهای رسوب ۱۸ حوضه را منعکس کرده‌است [۳۰]. بنابراین چنانچه یک حوضه دارای ظرفیت انتقال رسوب متفاوتی باشد، ممکن است نرخ تحویل رسوب تخمینی نادرست باشد. تفاوت بین ویژگی‌های حوزه آبخیز طالقان و حوزه‌های آبخیز در جنوب ایالت متحده قطعاً بر دقت بارهای رسوبی تخمینی در ایستگاه‌های جوستان و گلینک تأثیرگذار بوده است. علاوه بر موارد ذکر شده، با توجه به اینکه داده‌های رسوب تنها در برخی از روزهای ماه اندازه‌گیری می‌شود و برای همه روزها مقادیر اندازه‌گیری شده موجود نیست؛ بنابراین لازم است که برپایه همبستگی رسوب و دبی اندازه‌گیری شده، مقادیر رسوب برای سایر روزها برآورد گردد که معمولاً با استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب انجام می‌شود. برآورد مقادیر رسوب به صورت روزانه از طریق منحنی سنجه رسوب یکی دیگر از منابع عدم قطعیت به شمار می‌رود. در این تحقیق روش‌های مختلف برآورد رسوب از طریق منحنی سنجه رسوب مورد ارزیابی قرار گرفت و روش حدوسط دسته‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. عرب‌خدری نیز [۲] انواع روش‌های برآورد رسوبدهی معلق را در یک حوضه با رژیم برفی بارانی بررسی و روش حد وسط دسته‌ها را به عنوان مناسب‌ترین روش پیشنهاد کرده بود. با توجه به اینکه اغلب اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب در دبی‌های کم انجام شده‌اند، برون‌یابی در دبی‌های خیلی بالا یکی از عدم قطعیت‌های مهم برآورد رسوبدهی است.

با وجود خطاهای مذکور در رابطه با شبیه‌سازی رواناب و بخصوص رسوب با توجه به نتایج جدول ۱ دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر رولناب و رسوب مورد قبول بود. براساس تحقیق Moriasi و همکاران [۲۰] چنانچه ضریب همبستگی و نش ساتکلیف برای مقادیر رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT بالاتر از ۰/۵ بدست آید، نتایج رضایت بخش است. در مورد ضریب PBIAS بهترین مقدار صفر است و مقادیر مثبت این شاخص

حکایت از کم برآورد مدل دارد. Moriasi [۲۰] مقادیر PBIAS کمتر از ۲۰ درصد را برای رواناب و رسوب قابل قبول دانست. همچنین براساس مقادیر PBIAS تنها در مورد برآورد رواناب ایستگاه جوستان کم برآورد مشاهده شد و سایر موارد مدل بیش برآورد داشته است.

البته لازم به ذکر است که در صورت کالیبراسیون مدل و تنظیم پارامترهای حساس طبق شرایط منطقه مطالعاتی، شبیه سازی متغیرها با دقت بالاتری انجام می‌شود، اما در این تحقیق از آنجاییکه هدف مقایسه نتایج دو رویکرد تعریف HRU در شرایط مساوی بود؛ کالیبراسیون مدل ضرورت نداشت و انجام نشد.

جدول ۱. ضرایب آماری برای رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده براساس دو رویکرد تعریف HRU (۲۰۱۸-۲۰۰۳)

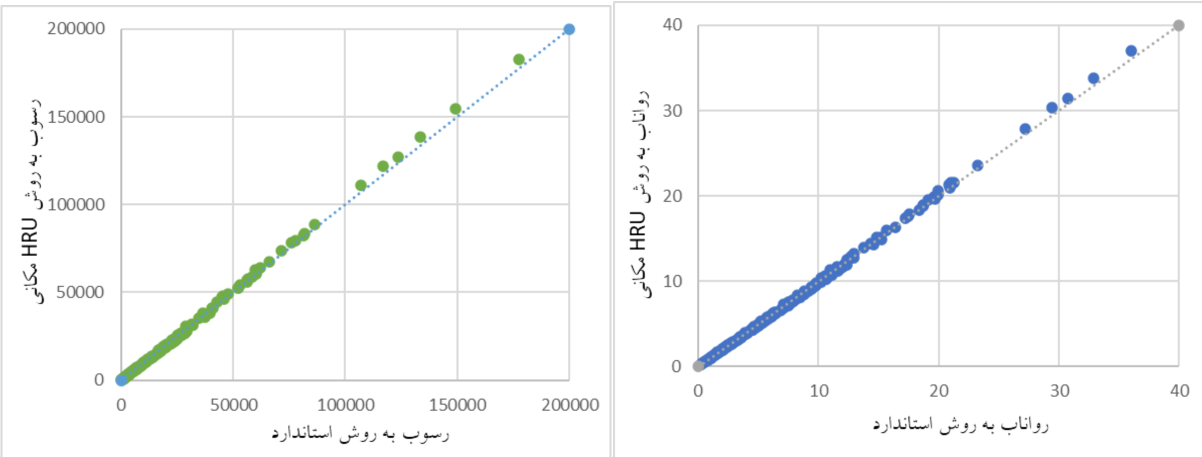
ایستگاه هیدرومتری	متغیر	ضرایب آماری	استاندارد	HRU مکانی
جوستان	رواناب	R^2	۰/۷	۰/۶۹
		NS	۰/۶۹	۰/۶۸
		PBIAS	۶/۲	۶/۶
	رسوب	R^2	۰/۵۶	۰/۵۵
		NS	۰/۵۵	۰/۵۴
		PBIAS	-۱۲/۸	-۱۳/۴
گلینک	رواناب	R^2	۰/۷۵	۰/۷۴
		NS	۰/۷۵	۰/۷۴
		PBIAS	-۲/۳	-۱/۷۶
	رسوب	R^2	۰/۶۴	۰/۶۲
		NS	۰/۶۴	۰/۶۱
		PBIAS	-۱/۴۸	-۴/۱

شاخص‌های آماری محاسبه شده برای متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده براساس دو رویکرد در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده بطور کلی بجز رواناب ایستگاه جوستان در سایر موارد، مدل در شبیه‌سازی میانگین متغیرها بیش برآورد داشته است، در حالیکه در بیشتر موارد مدل مقادیر کمینه و بیشینه جریان و رسوب را کمتر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است.

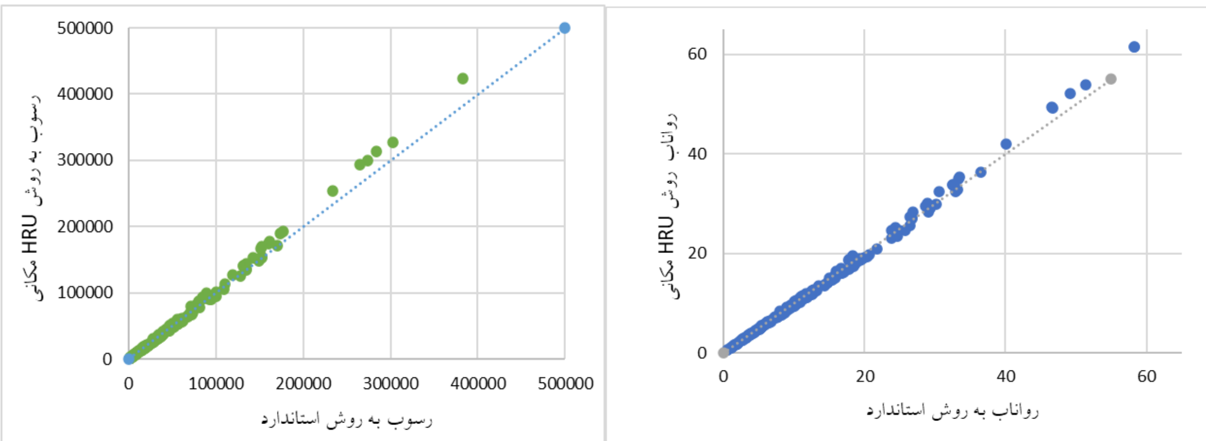
جدول ۲. شاخص‌های آماری مقادیرمشاهداتی و شبیه‌سازی شده براساس دو رویکرد تعریف HRU (۲۰۱۸-۲۰۰۳)

ایستگاه	جوستان						گلینک					
متغیر	رواناب (مترمکعب بر ثانیه)			رسوب (تن در سال)			رواناب (مترمکعب بر ثانیه)			رسوب (تن در سال)		
شاخص آماری	مشاهداتی	استاندارد	HRUمکانی	مشاهداتی	استاندارد	HRUمکانی	مشاهداتی	استاندارد	HRUمکانی	مشاهداتی	استاندارد	HRUمکانی
میانگین	۸/۳	۷/۸	۷/۸	۲۲۰۹۶۲	۲۴۹۳۷۱	۲۵۰۶۹۰	۱۲/۵	۱۲/۸	۱۲/۷	۵۷۸۹۶۲	۵۸۷۵۷۲	۶۰۲۸۰۲
حداقل	۱/۹	۰/۳	۰/۳	۶۱۸۵۴	۸۱۱۶۶	۸۱۹۰۲	۱/۹	۰/۶	۰/۶	۲۰۴۳۵۵	۲۱۵۸۵۸	۲۲۲۰۳۱
حداکثر	۳۸/۸	۳۹/۳	۴۰/۱	۳۹۷۱۸۶	۳۸۰۱۴۱	۳۸۲۸۹۵	۶۴	۵۸	۶۱	۹۹۳۴۸۷	۹۱۰۳۴۰	۹۴۴۰۴۵
انحراف معیار	۸/۱	۷/۱	۷/۲	۱۰۵۵۹۷	۷۹۵۱۸	۷۹۹۵۵	۱۲/۴	۱۰/۸	۱۱/۲	۲۴۱۳۱۹	۱۹۵۱۶۵	۲۰۰۵۲۴

براساس شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده براساس HRUs مکانی در مقایسه با روش استاندارد کمی بیشتر بود که این اختلاف در ایستگاه گلینک واقع در خروجی حوضه مشهودتر بود. بطور کلی در مقایسه نتایج مدل براساس دو رویکرد HRU تفاوت محسوسی در دقت مدل برای دو حالت مشاهده نشد. (جداول ۱ و ۲، شکل‌های ۶ و ۷). در تحقیقاتی که توسط Kalcic و همکاران، [۱۵] و Teshager و همکاران، [۲۵] انجام شد نیز از این روش در مکانی نمودن HRUs در مناطقی نسبتاً هموار با کاربری غالب کشاورزی استفاده شد و نتایج حاصل از این روش قابل قبول و مشابه نتایج اجرای مدل در حالت استاندارد بود.



شکل ۶. نمودار یک به یک رواناب (مترمکعب بر ثانیه) و رسوب (تن در سال) شبیه سازی شده به روش استاندارد و HRU مکانی، ایستگاه جوستان



شکل ۷. نمودار یک به یک رواناب (مترمکعب بر ثانیه) و رسوب (تن در سال) شبیه سازی شده به روش استاندارد و HRU مکانی، ایستگاه گلینک

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک رویکرد ساده برای مکانی کردن HRUs در مدل SWAT اتخاذ شد و نقشه HRU پیش فرض از طریق پیش پردازش نقشه‌های خاک و کاربری/پوشش اراضی و در نظر گرفتن اسامی منحصر به فرد برای واحدهای خاک در هر زیرحوضه تهیه شد. مقادیر رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده بر اساس این رویکرد منطقی بود و در مقایسه با روش استاندارد اختلاف بسیار کمی داشت. این رویکرد انعطاف‌پذیر بوده و می‌تواند

براساس هر مرز مورد نظر دیگری و با توجه به هدف انجام شود. برای مثال Kalcic و همکاران [۱۵] مکانی کردن HRUs را براساس مرزهای زمین‌های زراعی و به روشی مشابه روش تحقیق حاضر انجام دادند. مطالعاتی که تاکنون با این روش انجام شده در مناطق کم شیب و نسبتاً هموار بوده است در حالیکه در این تحقیق این روش در منطقه کوهستانی با دامنه‌های پرشیب انجام شد. با توجه به نتایج حاصل در نظر گرفتن یک طبقه شیب در مراحل ایجاد HRU تأثیر چندانی بر دقت مدل‌سازی نداشت. در مطالعه‌ای که توسط Yacoub و همکاران [۳۱] به منظور بررسی اثر شیب بر دقت مدل‌سازی SWAT در یک منطقه کوهستانی انجام شد، در نظر گرفتن طبقات شیب تأثیری در بهبود نتایج نداشت، البته در حالتی که تعداد زیرحوضه‌ها کم بود تعریف طبقات شیب دقت شبیه‌سازی را افزایش داد. زیرا طبقات شیب تنها تعداد HRU را افزایش می‌دهند و در هر صورت میانگین شیب برای هر HRU در حین شبیه‌سازی توسط مدل در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی‌که در این تحقیق سعی شده بود اطلاعات خاک و کاربری/پوشش اراضی با دقت مناسبی تهیه شود و مراتع که سطح وسیعی از حوضه را به خود اختصاص داده بود به روش درخت تصمیم طبقه‌بندی شدند، در نتیجه تعداد HRU کافی ایجاد شد، ۱۴۶۱ HRU در حالت پردازش شده، بنابراین تعریف یک طبقه شیب تأثیری بر دقت مدل نداشت. نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی مدل براساس هر دو رویکرد قابلیت مدل SWAT را نشان می‌دهد، بطوریکه در حالت استاندارد با تعریف حد آستانه و در نظر گرفتن HRUs همگن به عنوان یک واحد در یک زیرحوضه، شبیه‌سازی با دقت و سرعت مناسبی انجام می‌شود. اما در برخی موارد لازم است تا اطلاعات مکانی HRUs در دسترس باشد، از کاربردهای HRUs مکانی تعریف و تخصیص اقدامات مدیریتی و دریافت خروجی مدل در سطح HRU است. این روش می‌تواند در شبیه‌سازی تغییرات کاربری/پوشش زمین در سطح HRU در مطالعاتی مانند مدیریت چندهدفه خدمات اکوسیستم [۳]، جفت کردن مدل تغییر پوشش/کاربری عامل محور با مدل SWAT [۲۲] و هدف گذاری استراتژیک و اولویت‌بندی مناطقی که به اجرای اقدامات مدیریتی خاصی نیاز دارند [۸]، استفاده شود. در نهایت استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق درصورتی‌که بنا به هدف موقعیت مکانی و یا الگوی تعریف HRUs دارای اهمیت باشد، در حوضه‌های کوچک و دارای اطلاعات پایه اندازه‌گیری شده با دقت مناسب پیشنهاد می‌شود.

References

[1] Agricultural Jihad Organization of Tehran. (2013). Detailed Studies of Garap Gateh Deh Watershed, 32p (in Persian).

[2] Arabkhedri, M., Hakimkhani, S. and Nikkami, D. (2002). Comparison of Several Statistical Methods of Estimating Suspended Load in a Basin with Snow and Rain Regime. A research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 63p (in Persian).

[3] Arnold, J.G. and Allen, P.M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records. JAWRA J Am Water Resour Assoc, 35,411–424.

[4] Bekele, E.G. and Nicklow, J.W. (2005). Multi-objective management of ecosystem services by integrative watershed modelling and evolutionary algorithms: management of ecosystem services. Water Resour Res, 41(10), 10p.

[5] Bieger, K., Hörmann, G. and Fohrer, N. (2014). Simulation of Streamflow and Sediment with the Soil and Water Assessment Tool in a Data Scarce Catchment in the Three Gorges Region, China. Journal of Environmental Quality, 43(1), 37-45.

[6] Bressiani, D.A., Gassman, P.W., Fernandes, J.G., Garbossa, L.H.P., Srinivasan, R., Bonuma, N.B. and Mendiondo, E.M. (2015). A review of SWAT (Soil and Water Application Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. Int J Agric Biol Eng, 8, 9–35.

[7] Cao, W., Bowden, W.B., Davie, T. and Fenemor, A. (2006). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. Hydrol. Processes, 20, 1057–1073.

[8] Daggupati, P., Douglas-Mankin, K.R., Sheshukov, A.Y., Barnes P.L. and Devlin, D.L. (2011). Field-level targeting using SWAT: mapping output from HRUs to fields and assessing limitations of GIS input data. Trans. ASABE, 54, 501–514.

[9] Douglas-Mankin, K.R., Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. Trans ASABE, 53, 1423–1431.

[10] Fuka, DR., Walter, M.T., Archibald, JA., Steenhuis, T.S. and Easton ZM. (2015). A community modelling foundation for Eco-Hydrology.

[11] Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Trans. ASABE, 50, 1211–1250.

[12] Ghebremichael, L.T., Veith, T.L., Hamlett, J.M. and Gburek, W.J. (2008). Precision feeding and forage management effects on phosphorus loss modelled at a watershed scale. Journal of Soil and Water Conservation, 63(5), 280–291.

[13] Gitau, M.W., Veith, T.L. and Gburek, W.J. (2004). Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction. Trans. ASAE, 47(6), 1923–1931.

[14] Johnston, R. and Smakhtin, V. (2014). Hydrological Modeling of Large River Basins: How Much is Enough? J of Water Resour Manage, 28, 2695–2730.

[15] Kalcic, M.M., Chaubey, I. and Frankenberger, J. (2015). Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 8(3), 69-80.

[16] Krysanova, V. and White, M. (2015). Advances in water resources assessment with SWAT an overview. Hydrol Sci J, 60(5), 771–783.

[17] MATLAB version 7.14.0. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. (2012).

[18] Merriman, K.R., Russell, A.M., Rachol, C.M., Daggupati, P., Srinivasan, R., Hayhurst, B.A. and Stuntebeck, T.D. (2018). Calibration of a field-scale Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model with field placement of best management practices in Alger Creek, Michigan. *Sustainability*, *10*(3), 1-23.

[19] Moradi Pour, SH. (2011). Soil erosion and sediment transport simulation using spatially distributed hydrological WetSpa model in Taleghan watershed, Alborz province. a Thesis of M.Sc. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 149p (in Persian).

[20] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.

[21] Neitsch, S.L., Arnold, J.R. and Williams, J.R. (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation. 647p.

[22] Ng, T.L., Eheart, J.W., Cai, X. and Braden, J.B. (2011). An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop. Water Resources Research, 47, 17p.

[23] Pai, N., Saraswat, D. and Srinivasan, R. (2011). Field_SWAT: a tool for mapping SWAT output to field boundaries. Computers & Geosciences, 40, 175–184.

[24] Refahi, H., and Sarmadian, F. (1993). Taleghan Watershed Studies. Tehran Regional Water Organization, 73p (in Persian).

[25] Teshager, A.D., Misgna, G., Gassman, P., Secchi, S., Schoof, J. and Misgna G. (2016). Modeling agricultural watersheds with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Calibration and Validation with a Novel Procedure for Spatially Explicit HRUs. Journal of Environmental Management, 57,894-911.

[26] The Office of Water Resources Basic Studies. (2015). Studies on Updating the Water Balance of Sefidrud Watershed, 69p (in Persian).

[27] Tuppad, P., Douglas-Mankin, K.R., Lee, T., Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/ water quality model: extended capability and wider adoption. Trans ASABE, 54, 1677–1684.

[28] Veith, T.L., Sharpley, A.N. and Arnold, J.G. (2008). Modelling a small, northeastern watershed with detailed, field-level data. Trans. ASABE, 51(2), 471–483.

[29] Winchell, M., Srinivasan, R.Di., Luzio, M. and Arnold, J. (2013). User's Guide, ArcSWAT Interface for SWAT 2012.

[30] Williams, J.R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull, 11,965–974.

[31] Yacoub, C. and Foguet, A.P. (2013). Slope Effects on SWAT Modeling in a mountainous Basin. Journal of Hydrologic Engineering, 18(12), 1663-1673.

Journal of Range and Watershed Management
Volume 75, No. 2, Summer 2022

pp. 213-226

Accepted: 2022-08-25

Received: 2022-06-20

Defining spatially continuous Hydrological Response Units for hydrological modelling in a mountainous watershed with SWAT (Case Study: Taleghan watershed)

- **M. Haji Mohammadi;** PhD candidate in watershed Management sciences and engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- **A. A. Nazari Samani*;** Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- **A. Zare Garizi;** Assistant Professor, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- **H. Keshtkar;** Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- **M. Arabkhedri;** Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran.
- **A. Sadoddin;** Associate Professor, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Abstract

The SWAT model is widely used to simulate watersheds and evaluate the impact of conservation watershed management practices. In this model, the simulation of the watershed processes is based on hydrological response units (HRUs) which are created by overlaying land use /land cover, soil and slope maps. Meanwhile, in the HRUs definition steps, these units become conceptual and lose their spatial location and continuously. This approach is a useful and often inevitable way to simulate large and heterogeneous watersheds in terms of computational efficiency. However, if the aim is spatializing and evaluating the effectiveness of management methods on runoff, sediment and other pollutants in medium to small basins, it is necessary to know the exact location of HRUs. The purpose of conducting this study was present a new approach to defining spatial and independent HRUs and compare the simulation results based on this method with the standard form of the model. In the new approach, independent and spatial HRUs are defined through pre-processing procedures in GIS and uniquely named soil units. The model results of both approaches were very similar and no significant difference was observed in the model outputs in Taleghan watershed. The Nash-Sutcliffe coefficient of the simulated runoff and sediment at the outlet with the standard approach was 0.75 and 0.64, respectively. While, it was obtained 0.74 and 0.61, respectively for the new approach. The definition of spatial HRUs by applying the proposed method provides more tangible and practical outputs, which is more beneficial for identifying the critical areas as well as locating conservation practices compared to the conceptual HRUs approach.

Keywords: Taleghan watershed, SWAT hydrological model, hydrological response units, management practices, independent HRUs.

*Corresponding Author: Tel: +98 9122643601 Email: aknazari@ut.ac.ir